

УДК 621.396.670

Герасименко К. В. Тел.: +380 (97) 241 79 18. E-mail: c.herasymenko@gmail.com

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНИХ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АЛГОРИТМУ АДАПТИВНОЇ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ОСНОВІ МЕТОДУ СПОЛУЧЕНИХ ГРАДІЄНТІВ

Herasymenko K. V. Model of complex weighting coefficients adaptive spatial filtering algorithm based on conjugate gradient method. In recent years, GPS and GLONASS are widely used in both civilian and military applications for navigation, positioning, distance measurement, missile guidance, time synchronization and other applications. However, GPS and GLONASS signals are very weak and easily fall under the influence of radio frequency interference. Suppression GPS and GLONASS signals can have different types, intentional or not intentional. The paper presents a comprehensive definition of the weighting coefficients of adaptive spatial filtering algorithm based on conjugate gradient method. A distinctive feature of this model is the use of quasi-Newton method for finding the minimum objective function – conjugate gradient method, it can significantly reduce the computational cost of the calculation, while ensuring a given level of noise suppression. Research potential characteristics of the adaptive interference compensator with interference suppressed three showed that adaptive equalizer allows for the suppression of so many obstacles to the level of no worse than 40 dB.

Keywords: noise suppression, conjugate gradient, interference compensator, quasi-Newton method, spatial filtering, objective function, GPS, GLONASS

Герасименко К. В. Модель визначення комплексних вагових коефіцієнтів алгоритму адаптивної просторової фільтрації на основі методу сполучених градієнтів. В роботі запропоновано підхід із визначення комплексних вагових коефіцієнтів алгоритму адаптивної просторової фільтрації на основі методу сполучених градієнтів. Відмінною особливістю такої моделі є використання квазі-ньютонівського методу для пошуку мінімуму цільової функції – методу сполучених градієнтів, це дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати на розрахунок, при забезпеченні заданого рівня подавлення завад. Дослідження потенційних характеристик адаптивного компенсатора завад при подавленні до трьох завад показало, що адаптивний компенсатор дозволяє провести подавлення такої кількості завад із рівнем не гірше 40 дБ.

Ключові слова: подавлення завад, сполучений градієнт, компенсатор завад, квазі-ньютонівський метод, просторова фільтрація, цільова функція, GPS, GLONASS

Герасименко К. В. Модель определения комплексных весовых коэффициентов алгоритма адаптивной пространственной фильтрации на основе метода сопряженных градиентов. В работе предложен подход по определению комплексных весовых коэффициентов алгоритма адаптивной пространственной фильтрации на основе метода сопряженных градиентов. Отличительной особенностью такой модели является использование квази-ньютоновского метода для поиска минимума целевой функции – метода сопряженных градиентов, это позволяет значительно сократить вычислительные затраты при обеспечении заданного уровня подавления помех. Исследование потенциальных характеристик адаптивного компенсатора помех при подавлении до трех помех показало, что адаптивный компенсатор позволяет провести подавления такого количества помех с уровнем не хуже 40 дБ.

Ключевые слова: подавление помех, сопряженный градиент, компенсатор помех, квази-ньютоновский метод, пространственная фильтрация, целевая функция, GPS, GLONASS

1. Вступ. Постановка задачі

В останні роки GPS та GLONASS широко застосовуються як в цивільних так і військових цілях для навігації, позиціонування, вимірювання відстані, наведенні ракет, синхронізації часу та інші області застосування. Тим не менш, GPS та GLONASS сигнали дуже слабкі та легко потрапляють під вплив радіочастотних завад. Подавлення сигналів GPS та GLONASS може мати різні типи, навмисний чи не навмисний характер. Дослідженням в цьому напрямку присвячене достатня кількість робіт [1-10]. За останні роки була проведена велика робота по підвищенню завадостійкості в GPS та GLONASS. Було розроблено багато радіочастотних методів по підвищенню завадостійкості. Одним перспективних методів підходів щодо

підвищення відношення сигнал/шум на вході приймача GPS/GLONASS є використання пристроїв які реалізують адаптивну просторову фільтрацію, що базується на гнучкому апаратному забезпеченні з використання цифрових сигнальних процесорів та програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС).

За таких умов, до алгоритмів адаптивної просторової фільтрації, які реалізуються на відповідних апаратних засобах, висуваються жорсткі вимоги до їх результуючої обчислювальної складності, так-як це визначає вартість використовуваних процесорів, інтегральних схем та відповідно пристрою подавлення завад у цілому. Таким чином, розробка ефективних алгоритмів адаптивної просторової фільтрації є актуальним завданням.

2. Структурно-алгоритмічна реалізація пристроїв просторової фільтрації

Одним з можливих підходів, які покладені в основу роботи пристроїв адаптивної просторової фільтрації, є метод мінімуму вихідної потужності сигналу на виході пристрою подавлення. Відповідно до цього методу у антенній решітці виділяють основну антену, вихід якої містить корисний сигнал і заваду, та додаткові (компенсаційні) антени, що не повинні містити корисного сигналу.

У літературі та на практиці найбільш часто розглядають дві антенні решітки: чотирьохелементну і семиелементну. Семиелементна решітка потребує значно більших апаратних можливостей для реалізації на її основі алгоритмів адаптивної просторової фільтрації, тому далі розглядатимемо чотирьохелементну систему, так як вона значно дешевша.

За таких умов, алгоритм подавлення завади реалізує цифрову адаптивну чотирьохелементну антенну решітку з такою діаграмою спрямованості, щоб її нулі були орієнтовані у бік джерел сигналів завади. Передбачається, що нулі діаграми спрямованості будуть глибиною не менш -40 дБ, що буде відповідати придушенню сигналів завади до аналогічного рівня. Для кожного із частотних діапазонів сигналів GPS/GLONASS (L1 або L2) антенна решітка складається із чотирьох елементів, позначених на Рис. 1 як Ант 1...Ант 4 і розташованих по сторонах квадрата на відстані $\lambda/2$. Всі випромінювачі мають широку діаграму спрямованості та приймають сигнали у верхній півсфері. Оскільки для обох діапазонів алгоритм подавлення однаковий, то далі достатньо розглянути алгоритм тільки для одного діапазону. Передбачається, що алгоритм цілком буде реалізований на ПЛІС (одна ПЛІС для діапазону L1 і друга для діапазону L2).

Основна ідея алгоритму – скласти сигнали від чотирьох випромінювачів з амплітудами та фазами так, щоб сформувати нуль просторової діаграми спрямованості у бік джерела сигналу завади. При цьому алгоритм буде підбирати амплітуди та фази кожного елемента з метою зменшення потужності сигналу завади. Амплітуди та фази на кожному елементі визначаються множенням сигналу прийнятого від кожного випромінювача на комплексний ваговий коефіцієнт. Комплексні коефіцієнти підбираються ітераціями за градієнтним квазі-ньютонівським методом. Важливо, що сигнал завади на $40...60$ дБ (а можливо та більше) перевищував корисні навігаційні сигнали від супутників. Крім того, супутники та джерела завад рознесені в просторі (по кутах). Тому антенна система з адаптивною діаграмою спрямованості яка реалізує мінімум вихідної потужності сигналу на сумарному виході зможе просторово придушити такі завади. При цьому формована діаграма залишає більшу частину корисних сигналів від супутників, місце розташування яких не відповідає нулям діаграми спрямованості. Це дасть можливість далі визначити координати – безпосередньо вирішувати навігаційну задачу.

На Рис. 1 сигнали з виходів чотирьох антенних випромінювачів після високочастотних блоків, що містять підсилювачі, змішувачі, фільтри та т.д. (позначені ВЧ), перетворюються в аналогові сигнали. Далі сигнал від кожного випромінювача оцифровується в аналогово-цифровому перетворювачі (АЦП), на виході кожного з яких виходить двійковий код. Далі сигнал у кожному каналі розкладається на квадратурні складові I та Q .

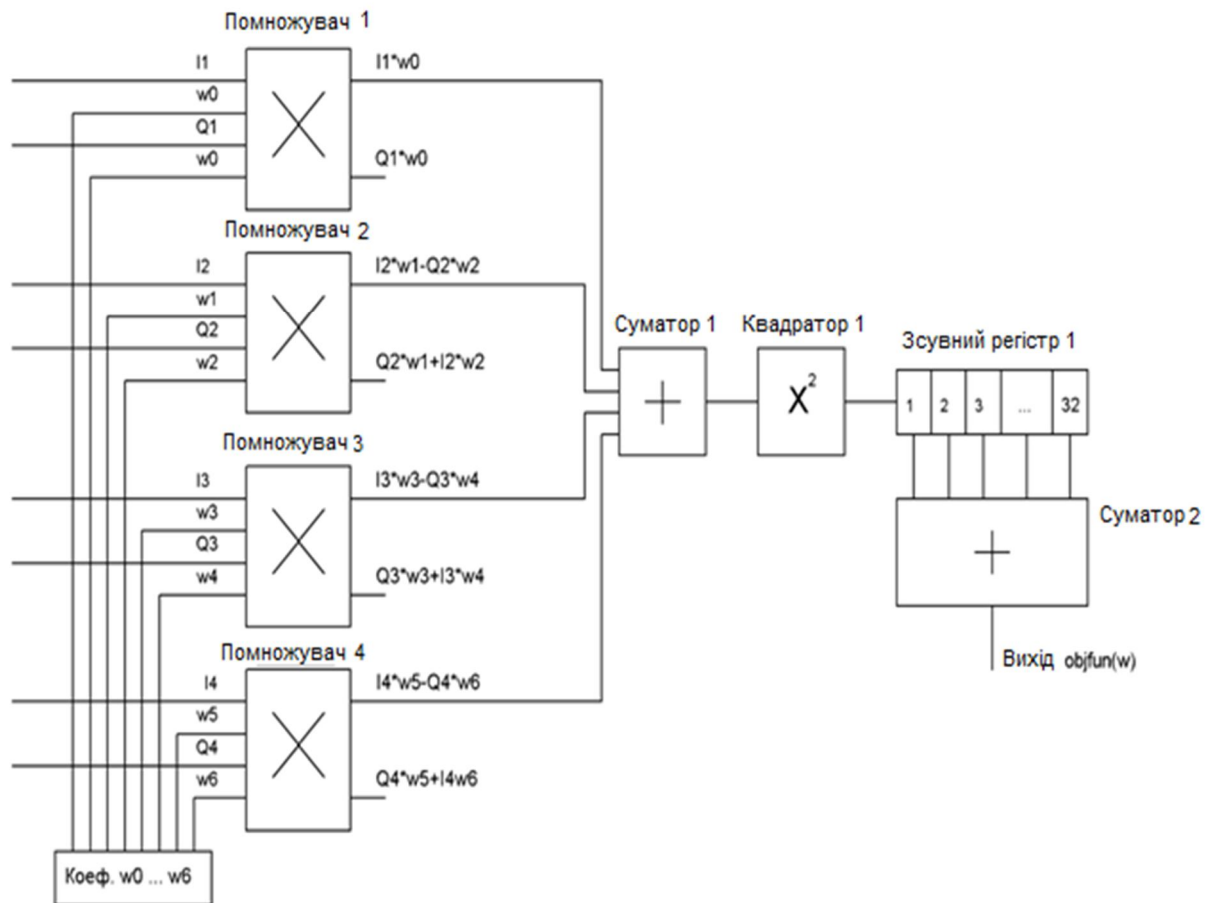
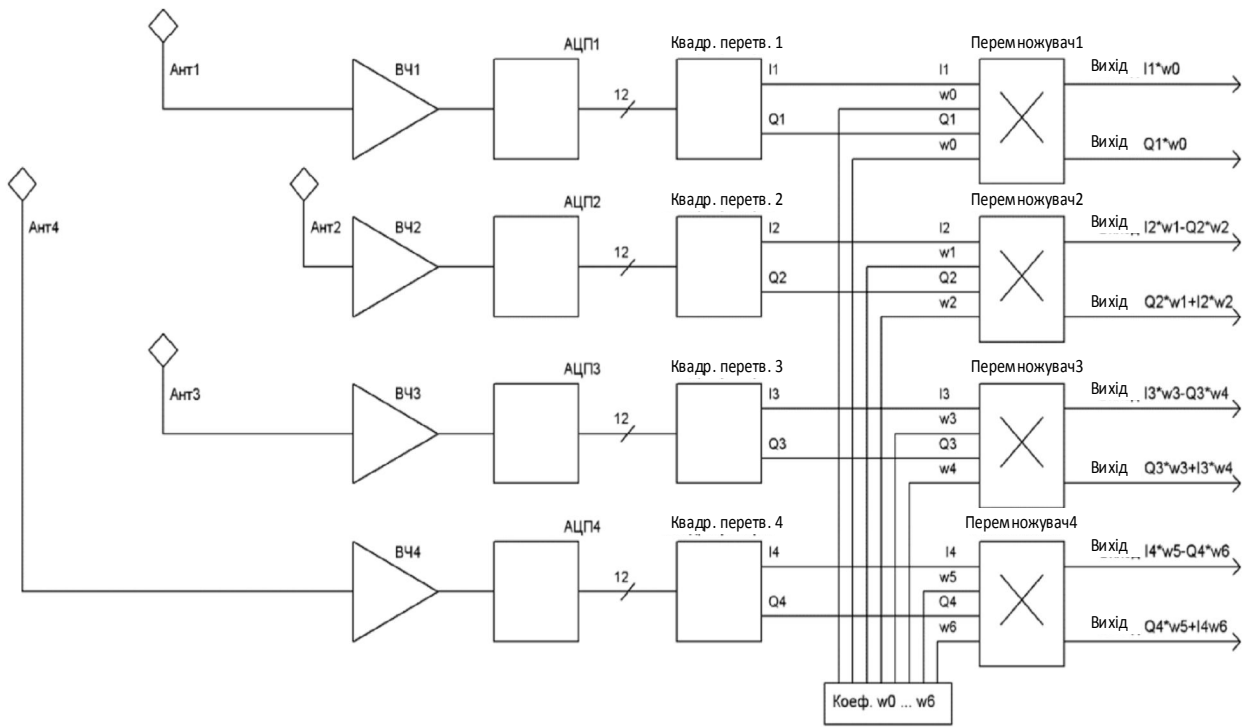


Рис. 1. Множення сигналів випромінювачів на комплексні коефіцієнти (верх схеми) і обчислення цільової функції (низ схеми)

Квадратурні складові сигналів позначені $I_1 Q_1, I_2 Q_2, I_3 Q_3, I_4 Q_4$ відповідно. Ці сигнали використовуються далі, як формування сумарного сигналу на виході подавлювача, так і роботи алгоритму адаптивного подавлення. Квадратурні складові сигнали використовуються для обчислення цільової функції $objfun$. При цьому алгоритм буде прагнути зменшити цю цільову функцію, відповідно зменшивши потужність завади.

Поточні комплексні вагові коефіцієнти зберігаються в пам'яті ПЛІС у вигляді вектору стовпця 6×1 .

$$W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

При цьому перший випромінювач має дійсний, незмінний у процесі роботи алгоритму, ваговий коефіцієнт $w_0 = 1$. Інші коефіцієнти будуть змінюватися динамічно для підстроювання виду діаграми спрямованості з метою зменшення функції $objfun(W)$.

Для кожного W обчислюється градієнт цільової функції (Рис. 1) за кожним коефіцієнту (6 значень), які також представлені у вигляді стовпця 6×1 .

$$gradW = \begin{pmatrix} gradient(w_1) \\ gradient(w_2) \\ gradient(w_3) \\ gradient(w_4) \\ gradient(w_5) \\ gradient(w_6) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{objfun(w_1 + dw_1, w_{2..6}) - objfun(w_{1..6})}{dw_1} \\ \frac{objfun(w_1, w_2 + dw_2, w_{3..6}) - objfun(w_{1..6})}{dw_2} \\ \frac{objfun(w_{1..2}, w_3 + dw_3, w_{4..6}) - objfun(w_{1..6})}{dw_3} \\ \frac{objfun(w_{1..3}, w_4 + dw_4, w_{5..6}) - objfun(w_{1..6})}{dw_4} \\ \frac{objfun(w_{1..4}, w_5 + dw_5, w_6) - objfun(w_{1..6})}{dw_5} \\ \frac{objfun(w_{1..5}, w_6 + dw_6) - objfun(w_{1..6})}{dw_6} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $dw_1 = dw_2 = dw_3 = dw_4 = dw_5 = dw_6$ малі прирости для обчислення в цифровому вигляді градієнтів по кожному ваговому коефіцієнту.

Відповідно до проведених досліджень величина $dw_1 \dots dw_6$ повинна мати порядок $10^{-6} \dots 10^{-8}$ (менше-краще). Реалізувати обчислення градієнтів у вигляді (2) для схеми (Рис. 1) не викликає складнощів.

Наприкінці роботи алгоритму мінімізації, підсумовані квадратурні сигнали I та Q (отримується аналогічно з сигналом I на схемі Рис. 1) використовуються при декодуванні сигналу GPS/GLONASS.

Для перевірки працездатності та визначення найкращих параметрів алгоритму мінімізації цільової функції $objfun(W)$ для схеми Рис. 1 розроблено модель в MatLab. У рамках дослідження перевірені ефективність і швидкість роботи алгоритму подавлення завад на основі методу BFGS, методу сполучених градієнтів, методу найшвидшого спуску. Щоб

забезпечити стабільність роботи алгоритмів, необхідно задавати умову визначення кінця ітераційного процесу пошуку мінімуму функції яка забезпечує мале значення приросту функції в кінці роботи алгоритму. За результатами емуляції роботи алгоритму в програмі Matlab ефективним є значення 10^{-9} – 10^{-10} .

Метод BFGS відноситься до методів оптимізації, які засновані на накопиченні інформації про кривизну цільової функції за спостереженнями за зміною градієнта. Метод враховує квадратичний характер цільової функції, і за рахунок цього в багатьох задачах оптимізації є більш ефективним, ніж метод найшвидшого спуска. Недолік цього методу при його реалізації на ПЛІС або мікроконтролері – обчислення матриці Геса (Hessian) з розмірністю 6×6 . У методі сполученого градієнта (Флетчера-Рівса) будується послідовність напрямків пошуку, що є лінійними комбінаціями поточного напрямку та попередніх напрямків, причому таких, щоб зробити напрямки пошуку сполученими. При цьому для обчислення нового напрямку пошуку використовуються тільки поточні та передостанній градієнти. Для деяких завдань оптимізації метод сполучених градієнтів більш ефективний, ніж метод BFGS. Метод найшвидшого спуска використовує для рішення завдання оптимізації значення градієнту тільки на поточному кроці [1-3].

Алгоритм працює безперервно, тому значення вагових коефіцієнтів випромінювачів решітки повинні замінятися на нові при їх обчисленні. Оскільки заваду вважаємо стаціонарною, то значення цільової функції взятої для 32-64 часових відліків та її градієнт слабо залежать від часу, а залежать тільки від вагових коефіцієнтів. Самі відліки можна в пам'яті не зберігати. Кількість часових відліків сигналів, які необхідно враховувати в цільовій функції, визначається складністю завад (широкосмуговість, модуляція).

Для завад зі смугою 15-40 МГц, які використовувалися при дослідженні ефективності алгоритмів, оптимальне значення кількості часових відліків становить 32-128. Коефіцієнти, знайдені з використанням у цільовій функції 16 часових відліків, забезпечують рівень подавлення на 5-10 дБ менше, ніж коефіцієнти, знайдені з використанням у цільовій функції 64 часових відліків.

Для моделювання вхідних сигналів у антенному компенсаторі в програмі Matlab Simulink створена схема високочастотного тракту (Рис. 2).

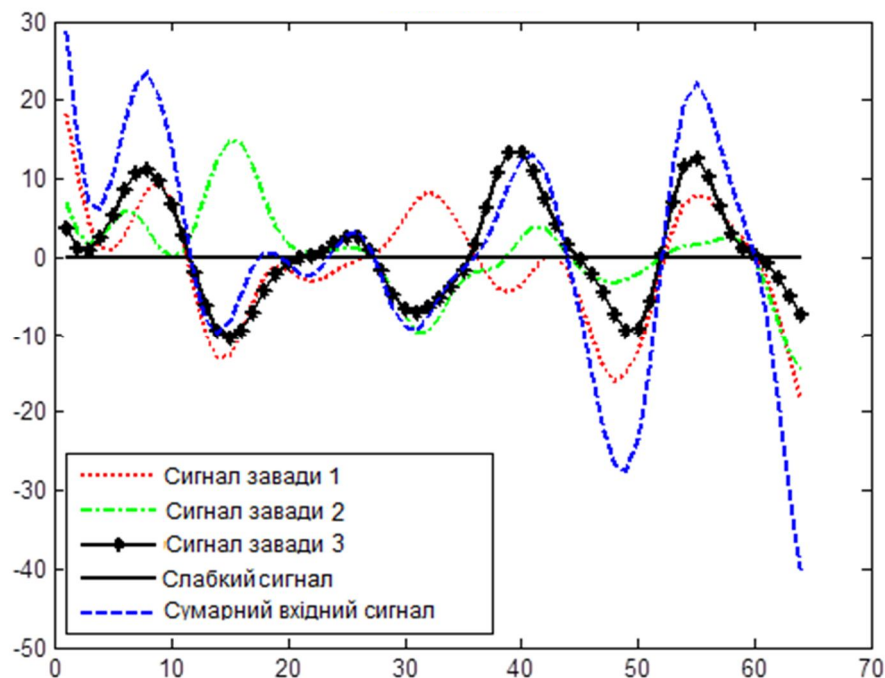


Рис. 2. Вхідні сигнали

На вхід схеми надходять 3 завади (Рис. 2), які змодельовані в наведеній схемі генераторами псевдовипадкової послідовності, що реалізують код Голда.

Кількість завад та їхній рівень регулюється атенюаторами, що стоять після генераторів псевдовипадкової послідовності. Суміш завад надходить у кожний з 4 каналів (по кількості антен, що беруть участь у подавленні завад).

У кожному каналі, беручи до уваги напрямок приходу завад (задається в програмі, що запускає Matlab) і розташування антен у решітці, завади затримуються в часі, емулюючи напрямок приходу із заданих кутів, і після цього підсумуються. Для перевірки роботи алгоритму проведено моделювання у якому подаються сигнали, наприклад, з таких напрямків: $\theta=10^\circ$, $\phi=30^\circ$; $\theta=75^\circ$, $\phi=135^\circ$; $\theta=40^\circ$, $\phi=270^\circ$.

Рівень подавлення завади залежно від кількості ітерацій при використанні кроку для обчислення градієнта $dw_1 = \dots = dw_6 = 10^{-8}$, 64 часових відліки для обчислення цільової функції та відношенні завада/шум 70 дБ.

Також перевірена працездатність алгоритму з антенною системою. Для цього, для антен 1-4 (Рис. 1) розраховується амплітуда та фаза прийнятих сигналів (Рис. 3). Ці дані переносяться в Matlab, де методом сполучених градієнтів розраховується необхідне значення коефіцієнтів.

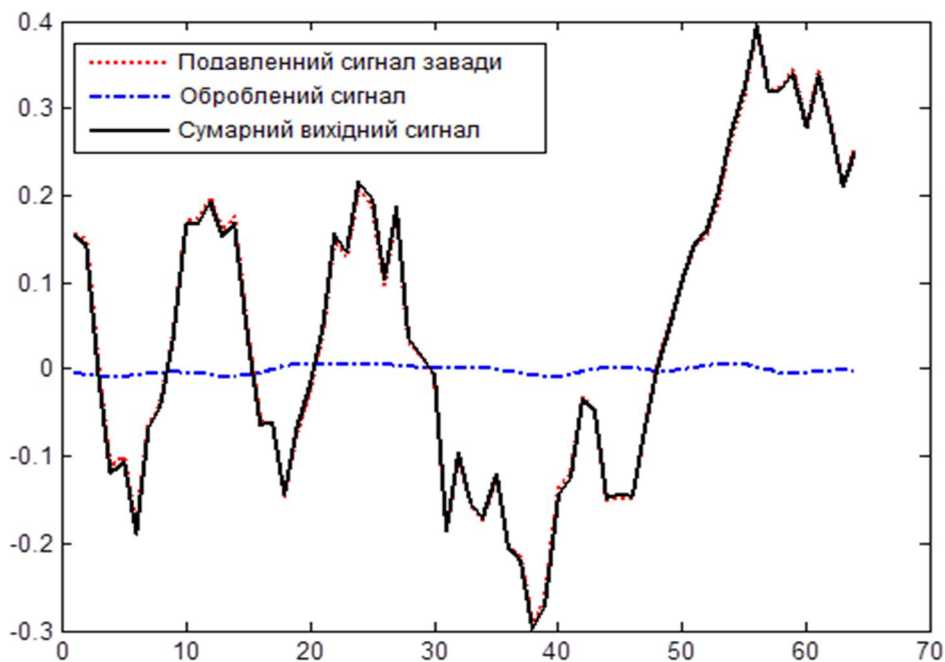


Рис. 3. Вихідні сигнали

З урахуванням отриманих коефіцієнтів (у комплексно сполученому вигляді) розраховується діаграма спрямованості решітки з антен 1-4. У підсумку отримані в результаті оптимізації коефіцієнти дозволяють отримати подавлення завади не гірше 50 дБ (Рис. 4, 5).

Порівняння швидкості роботи алгоритмів показано в Табл. 1. Метод сполучених градієнтів показує більш високу швидкість оптимізації, ніж метод BFGS, забезпечуючи після 30-40 ітерацій подавлення не гірше 40 дБ. Метод найшвидшого спуску по швидкості лише трохи уступає методу сполучених градієнтів.

Виходячи із аналізу даних, наведених у Табл. 1, для подавлення завад доцільно використовувати метод сполучених градієнтів.

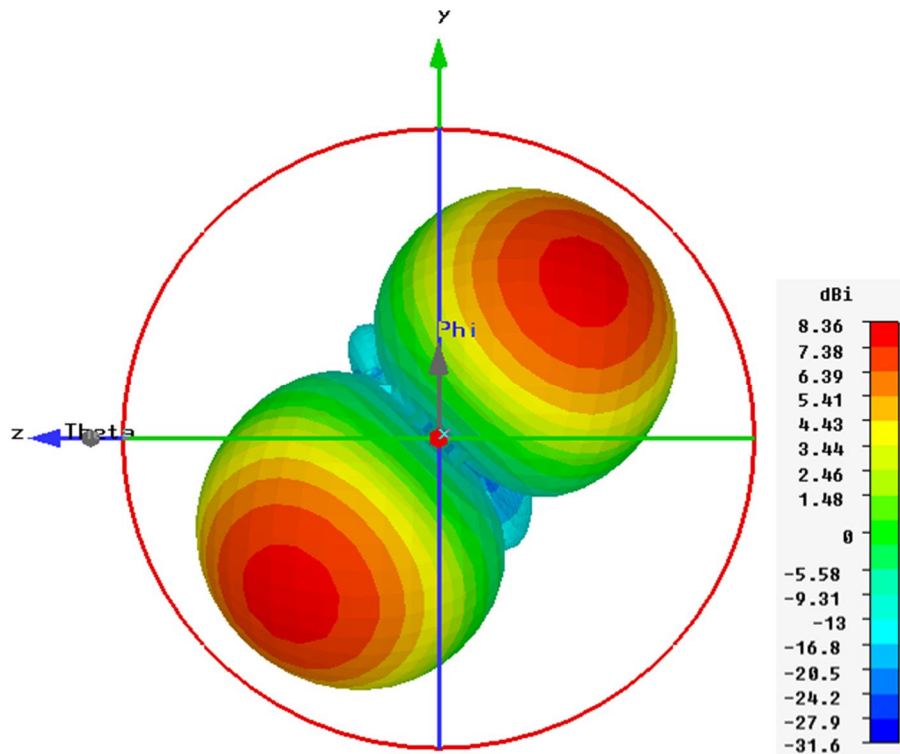


Рис. 4. Діаграма спрямованості антени без подавлення завади (у дБ)

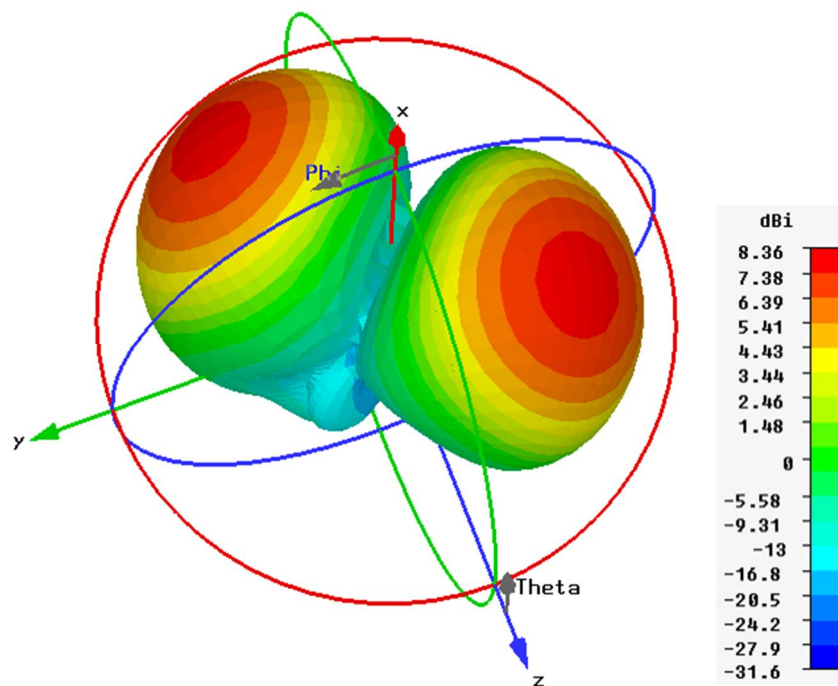


Рис. 5. Діаграма спрямованості антени без подавлення завади (у дБ)

**Ефективність роботи алгоритмів подавлення завади
для випадку трьох завад**

Табл. 1

Показник	Метод BFGS	Метод сполучених градієнтів	Метод найшвидшого спуску
Досягнення максимального рівня подавлення, ітерацій	200-250	30-40	50-60 (максимум менше на 2-4 дБ)

Таким чином, в результаті проведених досліджень вперше розроблено модель визначення комплексних вагових коефіцієнтів алгоритму адаптивної просторової фільтрації на основі методу сполучених градієнтів, її відмінною особливістю є використання квазі-Ньютонавського методу для пошуку мінімуму цільової функції – методу сполучених градієнтів, це дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати на розрахунок, при забезпеченні заданого рівня подавлення завад.

Висновки. Розроблено модель визначення комплексних вагових коефіцієнтів алгоритму адаптивної просторової фільтрації. Для її розробки проведено порівняння різних квазі-Ньютонавських методів мінімізації цільової функції векторного аргументу із різними параметрами налаштування. Усі алгоритми забезпечують досягнення потенційних характеристик просторової обробки при допустимих обчислювальних витратах.

Дослідження потенційних характеристик адаптивного компенсатора завад при подавленні до трьох завад показало, що адаптивний компенсатор дозволяє провести подавлення такої кількості завад із рівнем не гірше 40 дБ.

Література

1. Герасименко К. В. Адаптивні антенні системи / К. В. Герасименко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – Ювілейний випуск. – С. 179-183.
2. Герасименко К. В. Вдосконалений BFGS-алгоритм придушення завад в сучасних навігаційних супутникових системах / К. В. Герасименко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №3. – С. 75-80.
3. Герасименко К. В. Синтез компенсатора завад приймачам супутникової радіонавігаційної системи на основі адаптивної просторової фільтрації / К. В. Герасименко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – №4(38). – С. 49-54.
4. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0. – Москва : Главкосмос, 2002. – 217 с.
5. Кравченко Ю. В. Аналіз основних способів зниження радіолокаційної помітності та можливості їх застосування до наземних та повітряних об'єктів / Ю. В. Кравченко, Т. І. Дубас // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №2. – С. 19–25.
6. Кравченко Ю. В. Концепція синтезу локальної багатопозиційної радіонавігаційної системи / Ю. В. Кравченко, О. В. Лаврінчук, Р. М. Залужний // Системи озброєння і військова техніка. – 2009. – №2(18). – С.75–78.
7. Харисов В. Н. Исследования характеристик алгоритма глубокой интеграции СРНС/ИНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев // Радиотехника. – 2001. – №7. – С.56-63.
8. Харисов В. Н. Экспериментальные исследования алгоритма фильтрации относительных координат СРНС ГЛОНАСС с использованием фазовых измерений / В. Н. Харисов, Н. Т. Булавский // Радиотехника. – 1999. – №7. – С.40-48.
9. Харисов В. Н. Исследования одноэтапного алгоритма навигационно–временных определений для приемника СРНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев // Радиотехника. – 2001. – №4. – С.3-18.
10. Rifkin R. Comparison of Narrowband Adaptive Filter Technologies for GPS / R. Rifkin // MITRE Technical Report. – March 2000.

Дата надходження в редакцію: 12.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Кравченко